

Die hydrodynamische Bodendeformation, häufig auch als innere Erosion bezeichnet, ist nach Überströmen die häufigste Ursache für das Versagen von Dämmen. Von hydrodynamischer Bodendeformation spricht man, wenn Bodenpartikel im Damm oder dessen Untergrund bei Durchsickerung in Bewegung geraten. Es gibt mehrere Prozesse, die in diesem Sinn der Umlagerung von Bodenpartikeln zuzuordnen sind. Nach ZIEMS (1969) unterteilt sich die hydrodynamische Bodendeformation in Erosion, Suffosion und Kolmation. Die Erosion tritt als innere und äußere Erosion, als Kontakterosion an Schichtgrenzen und als Fugenerosion unter Massivbauwerken auf. Die Suffosion unterteilt sich in innere, äußere und Kontaktsuffosion.

Beim Nachweis der Sicherheit gegen hydrodynamische Bodendeformation kommen geometrische und hydraulische Kriterien zur Anwendung. Mit geometrischen Kriterien für Kontakterosion wird die Möglichkeit eines Eindringens des Basiserdstoffs in den Filtererdstoff untersucht. Ist Partikeltransport geometrisch möglich, findet dieser erst statt, wenn die Krafteinwirkung der Durchströmung auf die Partikel, zum Beispiel ausgedrückt durch den hydraulischen Gradienten, deren Widerstandskraft überschreitet, was Grundlage hydraulischer Kriterien ist (PERZLMAIER, 2006a).

Im Folgenden soll dargestellt werden, wie unter Verwendung des Systemansatzes nach FELL et al. (2006) die Prozesse der hydrodynamischen Bodendeformation besser verstanden und in eine zeitliche Abfolge eingeordnet werden können. Der Systemansatz wurde entwickelt, um an bestehenden Dämmen die Versagenswahrscheinlichkeit durch hydrodynamische Bodendeformation unter Verwendung prozessbasierter Ereignisbäume vergleichen zu können. Er wird den systemimmanenten Unsicherheiten (zum Beispiel Inhomogenität der Erdstoffe, Variabilität der hydraulischen Belastung, Zuverlässigkeit der Nachweise) bei der Bewertung der hydrodynamischen Bodendeformation besser gerecht als die isolierte Beurteilung einzelner Erosionsphänomene. Eine ähnliche Herangehensweise wurde unter anderem in den USA vom US Bureau of Reclamation (URS, 2000) sowie in England (KBR, 2003) erarbeitet und umgesetzt.

Der Systemansatz für hydrodynamische Bodendeformation

Phasen der hydrodynamischen Bodendeformation

Das Versagen durchströmter Dämme durch hydrodynamische Bodendeformation lässt sich in vier aufeinander folgende Phasen unterteilen

Die prozessorientierte Beurteilung der hydrodynamischen Bodendeformation

Dipl.-Ing. Sebastian Perzlmaier und Dipl.-Ing. Ronald Haselsteiner, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität München



(Bild 1). Der Erosionsbeginn fasst alle Prozesse zusammen, durch die Bodenpartikel in Bewegung geraten können. Die Erosionsentwicklung bewertet, ob der Erosionsprozess beispielsweise durch Filterwirkung gestoppt wird oder fortschreitet. Die Folgen eines progressiven Materialabtrags werden im Erosionsfortschritt, Bruch- und Versagensmechanismen in der Versagensphase zusammengefasst.

Bild 1. Fragen, Phasen und Kriterien im Systemansatz.

FRAGEN	PHASEN	KRITERIEN
Können Bodenpartikel in Bewegung geraten?	Erosionsbeginn durch: •rückschreitende Erosion (Oberfläche / Schichtgrenze) •lokale Leckage (im Dichtungselement / an Bauwerken) •Suffosion (Eigenstabilität der Böden)	Überwachung Suffosionskriterien
Kommt der Transport von Bodenpartikeln zum Erliegen oder schreitet er fort?	Erosionsentwicklung: •keine Erosion •etwas Erosion •ausgeprägte Erosion •fortschreitende Erosion •keine Filter	Filterwirksamkeit: geometrische Kriterien hydraulische Kriterien
Welche Folgen hat ein progressiver Austrag von Bodenpartikeln?	Erosionsfortschritt: •Erosionsröhrenstabilität •Erosionsröhrenvergrößerung •Setzungen / Setzungstrichter •Durchströmungsbehinderung (Stützkörper)	Standfestigkeit (Feinteilanteil / Bauwerke) Erodierbarkeit / Erosionsrate Gegenmaßnahmen Überwachung
Welche Mechanismen führen wie schnell zum Versagen?	Versagen: •Vergrößerung der Erosionsröhre •Kronensetzung mit Überströmung •Böschungsbruch mit Überströmung	Dauer Abflussdrosselung Notmaßnahmen

Dieser Beitrag gibt Einblick in aktuelle Entwicklungen auf dem Gebiet der hydrodynamischen Bodendeformation (innere Erosion). Mit dem Systemansatz, der das Versagen durch hydrodynamische Bodendeformation als Aneinanderreihung mehrerer Teilprozesse zu verstehen hilft, wird eine international anerkannte Herangehensweise vorgestellt. Gemeinsam mit der Beschreibung der Erosionsphasen wird ein Überblick über den Stand der Technik bezüglich der Entwurfsgrundsätze, der vorhandenen Nachweisverfahren sowie der Beurteilung bestehender Dämme gegeben. Abschließend wird exemplarisch die Anwendung des Systemansatzes zur Beurteilung der Gefahr der hydrodynamischen Bodendeformation an drei Szenarien in unterschiedlichen Deichsystemen beschrieben.

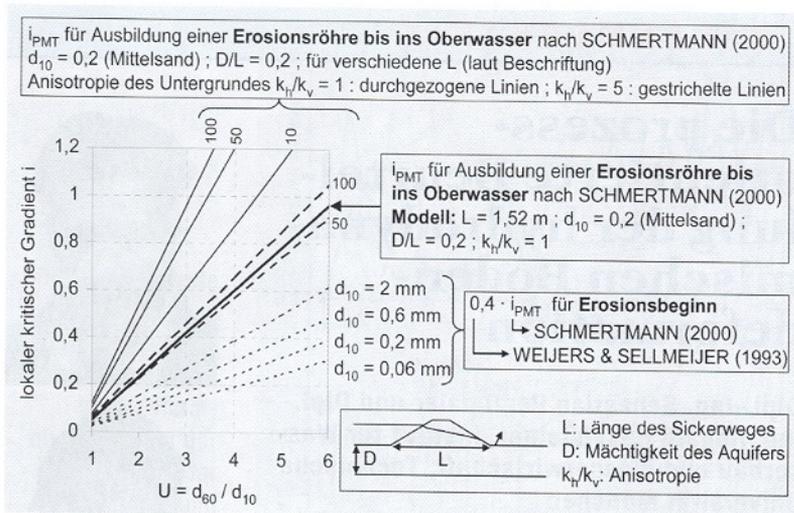


Bild 2. Kritische lokale hydraulische Gradienten für rückschreitende Erosion.

Erosionsbeginn

Erosionsbeginn durch rückschreitende Erosion

Die rückschreitende Erosion fasst die Fälle des Erosionsbeginns zusammen, bei denen der Partikeltransport beim Austritt der Durchsickerung an einer freien Oberfläche startet. Sie tritt entweder im Bereich hinter dem luftseitigen Böschungsfuß oder an der luftseitigen Böschung auf, aber auch an Schichtgrenzen von Erdstoffen, wenn keine ausreichende Filterwirkung besteht. Letzteren Fall bezeichnet man als Kontakterosion.

Die Durchsickerung kann bei homogenen Dämmen oder bei Versagen von Dichtungs- und Drainageelementen hinter dem Böschungsfußpunkt (Qualmwasser) oder auf der Böschung (Hangquelle) austreten. Es sind kritische hydraulische Gradienten, die bedingt durch die abtreibenden Strömungskräfte zu erdstatischem Versagen führen, und solche, die rückschreitende Erosion durch Transport einzelner Partikel beginnen, zu unterscheiden. Die hydraulische Belastung kann entweder durch mittlere Gradienten entlang dem gesamten Sickerweg oder durch lokale Gradienten am Punkt des Sickerwasseraustritts beschrieben werden.

Aus erdstatischer Sicht ist hinter dem luftseitigen Böschungsfußpunkt hydraulischer Grundbruch in körnigen Erdstoffen bei $i \geq i_{krit}$ mit $i_{krit} = (G_s - 1) \cdot (1 - e) \approx 1$ bis 1,4 (Nullspannungsbedingung; G_s – spezifisches Gewicht der Körner, e – Porosität) zu erwarten. Rückschreitende Erosion kann bereits bei deutlich kleineren Gradienten einsetzen. Der kritische hydraulische Gradient für den Erosionsbeginn durch rückschreitende Erosion in körnigen Erdstoffen wird maßgeblich von der Ungleichförmigkeit und dem Korndurchmesser beeinflusst (SCHMERTMANN, 2000). Besonders kritisch sind daher gleichförmige körnige Erdstoffe geringen Korndurchmessers wie Fein- und Mittelsande. SCHMERTMANN (2000) kommt durch Versuche zu kritischen lokalen Gradienten i_{PMT} , die für Ausbildung einer Erosionsröhre bis ins Oberwasser überschritten werden

müssen (Bild 2), und definiert Faktoren, die deren Übertragbarkeit auf praktische Fälle erlauben, unter anderem für die Länge des Sickerwegs L , die Dicke des Aquifers D , die Korngröße d_{10} und die Anisotropie k_h/k_v . WEIJERS/SELLMEIJER (1993) haben in ihren Versuchen festgestellt, dass rückschreitende Erosion bereits bei 40 % der Gradienten beginnen kann, die eine Ausbildung der Erosionsröhre bis ins Oberwasser bedingen. Aus der Zusammenschau dieser Erkenntnisse lassen sich die in Bild 2 dargestellten kritischen hydraulischen Gradienten für Erosionsbeginn durch rückschreitende Erosion abschätzen. Außerdem sind unter Berücksichtigung der Faktoren für unterschiedliche Sickerweglängen und Anisotropien errechnete kritische lokale Gradienten i_{PMT} für Ausbildung einer Erosionsröhre bis ins Oberwasser nach SCHMERTMANN (2000) dargestellt.

Die Auftriebssicherheit von bindigen Deckschichten, unter denen sich die Wasserdrücke aus dem Oberwasser fortpflanzen können, ist häufig nicht nachweisbar. Ein Aufbrechen der Deckschicht kann zu hydraulischem Grundbruch, zumindest aber zu Erosionsbeginn durch rückschreitende Erosion im darunter liegenden körnigen Erdstoff führen (FELL et al., 2006). Auch wenn ein Aufbrechen der Deckschicht bedingt durch deren Kohäsion selten zu beobachten ist, sollten zur Beurteilung eines möglichen Erosionsbeginns Fehlstellen angenommen werden. Diese können pflanzlichen oder tierischen Ursprungs sein. Der wesentliche Unterschied im Vergleich zu Fällen ohne bindige Deckschicht besteht in den anfänglich höheren lokalen hydraulischen Gradienten im Bereich der Fehlstelle. Außerdem sind Erosionsröhren, die sich unter dem Schutz der Deckschicht ausbilden, mit großer Wahrscheinlichkeit standfest.

Die wegen der Ähnlichkeit des Falls gerne herangezogenen Kriterien von BLIGH (1912), LANE (1935) und CHUGAEV (1962) (vgl. SAUCKE, 2004) basieren auf statistischen Auswertungen vieler unterströmter Wehr- und Dammbauwerke ohne Felsgründung. Die mittleren hydraulischen Gradienten nach BLIGH (1912) scheinen für Fälle ohne Untergrundabdichtung andere Sicherheiten zu enthalten als die von LANE (1935) (Tabelle 1), der horizontale Anteile des Sickerwegs nur zu einem Drittel ansetzt ($L = L_{vert} + L_{horiz}/3$). Zu den kritischen mittleren Gradienten nach CHUGAEV (1962) ist zu sagen, dass die angegebenen Spannen auf einem Fortschrittskoeffizienten (1,0 bis 1,3) basieren, der aus damaliger Sicht zukünftigen Wissensgewinn berücksichtigen sollte und deshalb nur die untere Grenze ein fundiertes Kriterium darstellt. Von den zu Grunde liegenden 162 ausgewerteten Bauwerken haben acht versagt. Allerdings waren die kritischen mittleren Gradienten bei fünf davon kleiner als die Untergrenze des Kriteriums (DAVIDENKOFF, 1970). Eine vertrauenswürdigere Abschätzung, basierend

Tabelle 1. Vergleich mittlerer kritischer hydraulischer Gradienten.

Bodenart	i_{krit} CHUGAEV ¹	abgemindert i_{krit} nach CHUGAEV ²	$H/L = i_{krit}$ nach BLIGH ³	$3 H/L = i_{krit}$ nach LANE ⁴	i_{krit} nach MÜLLER- KIRCHENBAUER ⁵	$i_{krit, we}$ nach WEIJERS/ SELLMEIJER ⁶
Kies	0,25	0,25	(0,10)	0,095	–	(0,28 / 0,34)
Grobsand			0,083	0,067	0,12 – 0,17	(0,18 / 0,28)
Mittelsand	0,15	0,11	(0,062)	0,056	0,08 – 0,10	0,16 / 0,24
Feinsand	0,12	0,10	0,056	0,061	0,06 – 0,08	0,09 / 0,14

¹ CHUGAEV (1962) aus DAVIDENKOFF (1970) ohne „Fortschrittskoeffizienten 1,3“

² CHUGAEV (1962) aus DAVIDENKOFF (1970) mit Berücksichtigung der aufgeführten Versagensfälle

³ Mittelsand und Kies sinngemäß aus Tabellen nach BLIGH (1912) in MALLETT et al. (1951)

⁴ Ohne vertikalen Sickerweg und L/3 für horizontalen Sickerweg nach LANE (1935) in MALLETT et al. (1951)

⁵ Für geschichteten Aufbau nach SAUCKE (2004)

⁶ Nach WEIJERS/SELLMEIJER (1993) mit: $U = 1,5$ (links) / 3 (rechts); D Mächtigkeit des Aquifers 10 m; L Länge des Sickerwegs; $D/L = 0,1$; $e = 0,39$; Kies und Grobsand außerhalb des Gültigkeitsbereiches; d_{50} Kies: 4 mm; Grobsand: 1 mm; Mittelsand 0,6 mm; Feinsand: 0,1 mm

auf dieser Erkenntnis, sollte mit abgeminderten Gradienten entsprechend Tabelle 1 erfolgen.

Mit dem Kriterium von WEIJERS/SELLMEIJER (1993) lässt sich ein boden- und geometrieabhängiger mittlerer kritischer Gradient $i_{krit, we}$ bestimmen, der zu rückschreitender Erosion und Ausbildung einer Erosionsröhre bis ins Oberwasser führt. Das Kriterium umfasst somit nicht nur Erosionsbeginn, sondern auch den Erosionsfortschritt. Gleiches gilt für die bereits vorgestellten Kriterien, mit deren Ergebnissen die von WEIJERS/SELLMEIJER (1993) weitgehend übereinstimmen (vgl. Tabelle 1), auch wenn die Autoren die Gültigkeit auf Fein- und Mittelsande einschränken. MÜLLER-KIRCHENBAUER et al. (1993) und SCHMERTMANN (2000) weisen auf den negativen Einfluss deichlagernaher Schichtungen im Untergrund hin, die zu kleineren mittleren kritischen Gradienten führen können (vgl. Tabelle 1).

Bezüglich der rückschreitenden Erosion bei Austritt der Sickerlinie an der Böschung muss aus erdstatistischer Sicht die lokale Standsicherheit erfüllt sein. Für kohäsionslose Erdstoffe ohne Vegetationsdecke und Dränagen lässt sich daraus eine maximale Böschungneigung ableiten, die mit Reibungswinkeln zwischen 25° (Sand) und 35° (Kies) Werte zwischen 1 : 4,5 und 1 : 3 annehmen. Unter der Annahme, dass die Sickerlinie am höchsten Austrittspunkt böschungsparell und am Böschungsfußpunkt bei dichtem Untergrund horizontal austritt, lassen sich nach DAVIDENKOFF (1964) die lokalen hydraulischen Gradienten berechnen. Der Anteil senkrecht zur Böschung, der einen Partikeltransport durch rückschreitende Erosion verursachen kann, nimmt für die oben beschriebenen Neigungen Werte zwischen 0,05 und 0,11 an. Hierbei handelt es sich um lokale Gradienten, die verglichen mit Bild 2 und Tabelle 1 einen Erosionsbeginn durch rückschreitende Erosion für Fälle, in denen die lokale Standsicherheit der Böschung bei körnigen Erdstoffen auch ohne Berücksichtigung der Wurzelkohäsion gegeben ist, unwahrscheinlich machen. Anders stellt sich die Situation dar, wenn auf der luftseitigen

Böschung eine Vegetationsdecke vorhanden ist, die weniger durchlässig ist als das Dammmaterial. Neben einem möglichen Aufstau der Sickerlinie kommt es an lokalen Fehlstellen in der Vegetationsdecke zu einem deutlichen Ansteigen der lokalen hydraulischen Gradienten und Erosionsbeginn durch rückschreitende Erosion ist wahrscheinlicher. Vor diesem Hintergrund erweisen sich neuerdings häufig angewendete Vegetationsdecken aus Magerrasen als günstig, da sie durchlässiger sind als die meisten Dammbaumaterialien (HASELSTEINER/STROBL 2004).

Erosionsbeginn in konzentrierten Leckagen

Konzentrierte Leckagen entstehen durch Risse in bindigen Erdstoffen wie Erdkernen, durch Fehlstellen in Dichtungen oder durch andere Zonen erhöhter Durchlässigkeit. Risse in bindigen Erdstoffen entstehen durch Setzungsunterschiede, Austrocknung, Frosteinwirkung oder Hydraulic Fracturing. Fehlstellen in Dichtungselementen können ausführungs- oder alterungsbedingt sein. Zonen erhöhter Durchlässigkeit entstehen durch einen übermäßigen Grobkornanteil (zum Beispiel Entmischung beim Schütten), durch schlechte Verdichtung, durch Wühltiere oder Bewuchs. Konzentrierte Leckagen können außerdem an Fugen zu Massivbauwerken auftreten, besonders wenn deren Oberflächen so geneigt sind, dass Setzungen und Verschiebungen des Erdkörpers zur Abnahme der Normalspannung in der Fuge führen.

Bindige Materialien werden landläufig als sicher gegen Erosion angesehen, wenn sie eine ausreichende Plastizität und Kohäsion aufweisen (BAW MAK, 1989). Diese Annahme gilt allerdings nur, wenn konzentrierte Leckagen ausgeschlossen werden können. Da dies in der Regel nicht der Fall ist, kann die Erosionssicherheit bindiger Erdstoffe letztlich nur durch Filter sichergestellt werden, die einen möglichen Materialaustrag verhindern oder stoppen, was in die Phase der Erosionsentwicklung fällt. Hier ist lediglich darauf hinzuweisen, dass Erosion von Kernmaterial in lokalen Leckagen nur dann gestoppt werden kann, wenn

sich Risse im Kern nicht in den Filter fortpflanzen. Daher rührt die Forderung nach kohäsionslosen Filtern für natürliche Dichtungen (KUTZNER, 1996, SCHULER, 1997), die durch Limitierung der Feinteile im Filter ($D < 0,075$ mm) auf maximal 5 % erfüllt werden kann. PARK (2003) zeigt, dass dieses Kriterium auch für plastische Feinteile Gültigkeit besitzt und für nicht-plastische Feinteile bis auf 15 % erweitert werden kann. Die in BAW MAK (1989) vorgeschlagenen Filter für bindige Erdstoffe – für Basen mit $I_p \geq 0,15$ und $c_u \geq 10$ kN/m² werden Filter mit $D_{10} \leq 0,016$ mm und $D_{60} \leq 2$ mm vorgeschlagen – entsprechen nicht uneingeschränkt dieser Forderung. Auch erscheint der geforderte Austausch von Böden mit $0 \leq c_u \leq 10$ kN/m² nicht zwingend erforderlich, da für solche Böden durchaus bewährte Filterkriterien existieren (SHERARD DUNNIGAN, 1989).

An der Kontaktfläche zu Massivbauwerken können konzentrierte Leckagen entstehen, in denen erhöhte Strömungsgeschwindigkeiten auftreten können und in der Folge Materialtransport stattfinden kann. Da es an Kriterien für die Nachweisführung mangelt, sei für horizontale Fugen auf die Überlegungen zur rückschreitenden Erosion und die Entsprechung mit den in Tabelle 1 zusammengestellten Fällen hingewiesen. Für vertikale Fugen mit aufwärts gerichteter Strömung empfiehlt SAUCKE (2006) das Kriterium von WITTMANN (1980). Außerdem erscheinen die auf Überlegungen zum Sedimenttransport basierenden Kriterien von MUCKENTHALER (1989) zutreffend, wobei die Durchlässigkeit als groß anzusetzen ist, und MUCKENTHALER (1989) empfiehlt, keine Adhäsion zu berücksichtigen. Der Fugenerosion kann zudem wirkungsvoll mit baulichen Maßnahmen begegnet werden (Untergrundabdichtung, Verwendung plastischer Erdstoffe im Anschlussbereich).

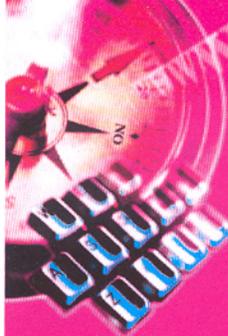
Erosionsbeginn durch Suffosion

Von Suffosion spricht man, wenn aus einem Erdstoff durch Sickerwasser selektiv Feinteile erodiert werden, ohne die Matrix aus größeren Körnern zu zerstören, was mit einer Vergrößerung von Porenraum und Durchlässigkeit einhergeht. Die resultierenden veränderten hydraulischen Randbedingungen können neben erdstatischem Versagen

Erosionsbeginn durch rückschreitende Erosion oder konzentrierte Leckagen begünstigen. Die Filterwirksamkeit von Filter-/Basiskombinationen ist nur gewährleistet, wenn sowohl Filter als auch Basis in sich stabil, also nicht suffosionsanfällig sind. Andernfalls können entweder selektiv ausgetragene Feinteile der Basis dafür zu groben Filter passieren, oder ein selektiver Austrag von Feinteilen aus dem Filter hinterlässt diesen zu grob, um die Basis zu filtern. Häufig wird als mögliche Folge von Suffosion eine verminderte Steifigkeit des Erdstoffs mit resultierenden Setzungen angeführt, was bestimmt vom Anteil der erodierten Fraktionen abhängt und nur schwer quantifizierbar ist.

Suffosionsanfällige Böden sind in der Regel stetig weit gestufte Böden mit aufwärts konkaver Kornverteilungslinie sowie intermittierend gestufte Böden, also Böden mit Ausfallkörnung. Dabei sind grobkörnige Böden mit einem begrenzten Anteil sehr feiner Körner sowie locker gelagerte Böden besonders kritisch. Für einen möglichen Erosionsbeginn durch Suffosion müssen drei Kriterien erfüllt sein (WAN/FELL 2004a). Erstens müssen die Körner der feinen Fraktionen klein genug sein, um durch die Porenengstellen der größeren Kornmatrix zu passen, zweitens muss der Anteil der feinen Fraktionen gering genug sein (< 30 bis 40 %), um die Zwischenräume der größeren Kornmatrix nicht auszufüllen, und drittens muss die Filtergeschwindigkeit ausreichend groß sein, um die Feinteile in der größeren Kornmatrix zu bewegen. Die kritischen hydraulischen Gradienten für Suffosion sind kleiner als die für rückschreitende Erosion.

Für den Nachweis der geometrischen Sicherheit gegen Suffosion empfiehlt BAW MSD (2005) eine Aufteilung in einen Fein- und einen Grobkornanteil mit nachfolgendem Nachweis der Filterstabilität. Die Trennung erfolgt in der Regel zwischen 10 und 20 % Siebdurchgang, gegebenenfalls bei markanten Knickpunkten in der Kornverteilung oder im Bereich der Ausfallkörnung (Sattelpunkt der Kornverteilung) bei intermittierend gestuften Böden. Der international gängige Nachweis nach KENNEY/LAU (1985, 1986) basiert auf der Vorstellung, dass für jede Fraktion mit dem Korndurchmesser d ein ausreichender Anteil an Korngrößen zwischen



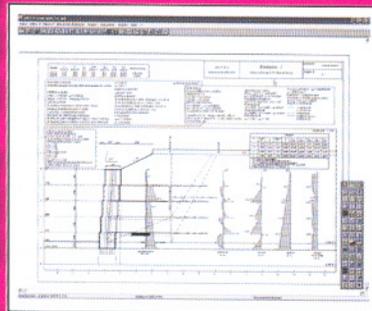
Praxisseminare und über 100 Software-Lösungen von **A** wie Auftragswesen, über **G** wie Grundbau und Bodenmechanik bis **Z** wie Zeiterfassung.

EDV für das Bauwesen

**UMWELT- UND GEOTECHNIK
BAU- UND VERMESSUNGSWESEN
WISSENSCHAFT UND TECHNIK**

GGU-GABION

Berechnung von Stützkonstruktionen aus Betonelementen, Blockschichtungen und Gabionen inkl. Geogitter

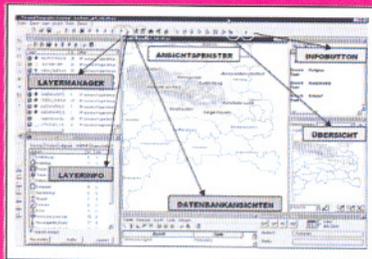


EasyPipe.Net

Statische Berechnung von erdverlegten Rohren nach DWA-Regelwerk (A 127) und anderen internationalen Normen

PGA

Der PGA (Personal Geographic Assistant) ist eine flexible GIS-Komplettlösung für die Verwaltung, Bearbeitung und Präsentation geografischer Daten



**civil
serve**

EDV für das Bauwesen

Civilserve GmbH

Weuert 5 · D-49439 Steinfeld

Telefon: +49 (0)18 02-2 48 45 73

Freefax: 08 00-2 48 45 73

Fax (int.): +49 (0)54 92-9 62 92-5

eMail: info@civilserve.com

Internet: www.civilserve.com



EDV FACHHANDEL & SEMINARE

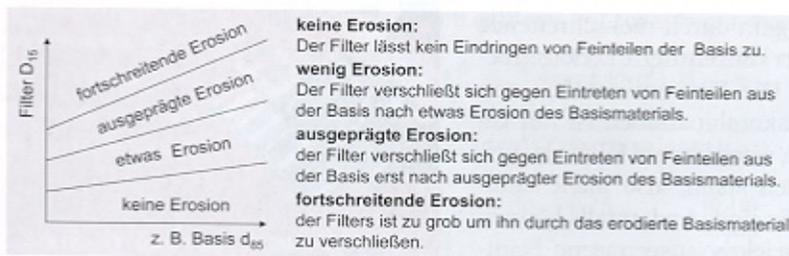


Bild 3. Bereiche der Erosionsentwicklung (FOSTER/FELL, 2001).

d und 4ϕ vorhanden sein muss, um Ausspülungen zu unterbinden. Das Verfahren beinhaltet eine systematische Einbeziehung aller relevanten Kombinationen aus Fein- und Grobkornanteil. Das Suffosionskriterium von BURENKOVA (1993) ist nach WAN/FELL (2004a) bei seiner Anwendung auf Erdstoffe mit Schluff- oder Tonanteilen weniger konservativ als das von KENNEY/LAU (1985, 1986). Um der Tatsache Rechnung zu tragen, dass unter Berücksichtigung sehr vieler Versuchsergebnisse ein eindeutiges geometrisches Kriterium für Sand- und Kiesböden mit und ohne Schluff- oder Tonanteile sehr konservativ ausfallen müsste, schlagen WAN/FELL (2004a) ein Suffosionskriterium vor, das die Suffosionsanfälligkeit auf wahrscheinlichkeitstheoretischer Grundlage beschreibt. Demnach sind Böden, die sowohl nach KENNEY/LAU (1985, 1986) als auch nach BURENKOVA (1993) als suffosionsanfällig einzustufen sind, mit großer Wahrscheinlichkeit nicht in sich stabil und umgekehrt. Außerdem zeigen WAN/FELL (2004a), dass die Suffosionsanfälligkeit mit zunehmender Porosität und abnehmendem Verdichtungsgrad zunimmt. Eine Abschätzung suffosionsgefährdeter Kornfraktionen kann nach BURENKOVA (1993) erfolgen.

Erosionsentwicklung

Ist Erosionsbeginn durch eines der oben beschriebenen Phänomene nicht auszuschließen, muss untersucht werden, ob progressiv ablaufender Materialaustrag einsetzen kann oder ob eine Veränderung der geometrischen und hydraulischen Randbedingungen diesen zum Erliegen bringt. Ob die Erosion fortschreitet, hängt in erster Linie

davon ab, ob der Austrittspunkt des Sickerwassers gefiltert ist oder nicht.

An der Schichtgrenze von Filter-/Basissystemen kann Filterwirkung entweder ohne oder mit Partikelbewegung erreicht werden. Bei letzterem Fall bildet sich durch Kolmation ein Filterkuchen aus (Versiegelung der Schichtgrenze durch Partikel des Basiserdstoffs). Bezüglich der Filterkriterien, die Erosionsentwicklung durch Kontakt-erosion ausschließen, sei auf die geometrischen Kriterien vom TERZAGHI/PECK (1948) mit $D_{15}/d_{85} < 4$, SHERARD/DUNNIGAN (1989, vgl. Tabelle 2) und auf die reichhaltige Zusammenstellung in PARK (2003) verwiesen.

Falls ein Nachweis mit geometrischen Kriterien scheitert, kann mit hydraulischen Kriterien abgeschätzt werden, ob Partikeltransport wahrscheinlich ist. Hydraulische Kriterien für Kontakt-erosion in körnigen Erdstoffen sind in SAUCKE (2006) zusammengestellt. Diese gehen in der Regel von einer intakten Bodenmatrix aus, was in der Praxis selten anzutreffen sein dürfte. Welchen Einfluss die Variabilität der Durchlässigkeit hat, lässt sich gut aus den Kriterien von MUCKENTHALER (1989) ablesen, dessen Ansätze auf dem Zusammenhang zwischen dem Durchmesser erodierter Partikel und der Strömungsgeschwindigkeit, die durchaus um eine Zehnerpotenz von der mittleren Geschwindigkeit abweichen kann, basieren (PERZLMAIER 2006a).

Ist die Kornverteilung des Filters zu grob, um jegliche Erosion zu verhindern, kommt es im Basismaterial zu etwas, zu ausgeprägter oder zu fortschreitender Erosion. Der Ansatz von FOSTER/FELL (2001) hilft bei der Beurteilung der Erosions-sicherheit von Filter-/Basissystemen, bei denen der Filter nicht modernen Filterkriterien genügt. Dabei sind die in Bild 3 gezeigten Bereiche zu unterscheiden. Angelehnt an das Filterkriterium von SHERARD/DUNNIGAN (1989) haben FOSTER/FELL (2001) basierend auf eigenen Versuchen, die Grenze, bis zu der keine Erosion auftritt, schärfer gezogen (Tabelle 2). Dabei fällt auf, dass ihr Kriterium für Basiserdstoffe mit einem Feinteilanteil $> 35\%$ strenger (feinere Fil-

Tabelle 2. Filterkriterien und Grenzen zwischen keiner und etwas Erosion.

Feinteilanteil F Basis [%] ¹	Filterwirksamkeit		Grenze keine / etwas Erosion	
	Spanne ²	Kriterium ³	Spanne ⁴	Kriterium ⁵
≥ 85	$D_{15} \leq (7 - 12) d_{85}$	$D_{15} \leq 9 d_{85}$	$D_{15} \leq [6,5 - 13,5] d_{85}$	$D_{15} \leq 6,5 d_{85}$
35 - 85	$D_{15} \leq 0,7 - 1,5 \text{ mm}$	$D_{15} \leq 0,7 \text{ mm}$	$D_{15} \leq 0,7 - 1,7 \text{ mm}$	$D_{15} \leq 0,5 \text{ mm}$
15 - 35	$D_{15} \leq [40 - F] \phi$ $(4 d_{85} - 0,7 \text{ mm})/25 + 0,7 \text{ mm}$		$D_{15} \leq 1,6 [(35 - F) \phi]$ $(4 d_{85} - 0,7 \text{ mm})/20 + 0,7 \text{ mm}$	
≤ 15	$D_{15} \leq (7 - 10) d_{85}$	$D_{15} \leq 4 d_{85}$	$D_{15} \leq [6,8 - 10] d_{85}$	$D_{15} \leq 7 d_{85}$

¹ F: Anteile Basis $< 75 \text{ mm}$, Grenzen der Bodengruppen von SHERARD/DUNNIGAN (1989) modifiziert nach FOSTER/FELL (2001) 35 % statt 40 %, Körnungslinie Basis muss auf $d_{90} = 4,75 \text{ mm}$ angepasst werden (gilt entsprechend für F in Tabelle 3)
² Beobachtete Spanne der Filterwirksamkeit nach SHERARD/DUNNIGAN (1989)
³ Entwurfskriterium nach SHERARD/DUNNIGAN (1989), Sicherheit vgl. 2., auch in US SCS (1986)
⁴ Beobachtete Spanne für keine Erosion nach FOSTER/FELL (2001)
⁵ vorgeschlagenes Kriterium für Grenze keine/etwas Erosion nach FOSTER/FELL (2001)

ter) und für solche mit einem Feinteilanteil < 35 % weniger streng (größere Filter) ausfällt. Die Grenzen zwischen etwas und ausgeprägter beziehungsweise zwischen ausgeprägter und fortschreitender Erosion nach FOSTER/FELL (2001) können bei der Beurteilung bestehender Dämme helfen (Tabelle 3). Bei der Beurteilung der Versagenswahrscheinlichkeit durch hydrodynamische Bodendeformation im Rahmen des Systemansatzes spielen diese Kriterien eine wichtige Rolle, wobei immer Körnungsbänder betrachtet werden sollten.

Erosionsfortschritt

Beim Erosionsfortschritt bedingt die hydraulische Schleppspannung in dem erodierenden Boden einen anhaltenden Materialaustrag. Es kann entweder zur Ausbildung von standfesten Erosionsröhren oder zu Setzungstrichtern (Nachsacken des Bodens über Stellen des Materialaustrags) kommen. Standfeste Erosionsröhren, die nicht bereits bei geringer Größe kollabieren, können nach FOSTER (1999) vor allem in bindigen Böden sowie in schluffigen Sanden und sandigen Schluffen mit einem Feinkornanteil ($d < 0,075$ mm) größer 15 % auftreten. Die Gefahr von standfesten Röhren besteht darüber hinaus unter Massivbauwerken und unter bindigen Deckschichten. Für den Fall, dass sich keine standfesten Erosionsröhren ausbilden, kann sich der Erosionsfortschritt

Tabelle 3. Grenzen zur ausgeprägten beziehungsweise fortschreitenden Erosion.

Basiserdstoff	Grenze etwas / ausgeprägte Erosion	Grenze ausgeprägte / fortschreitende Erosion
$d_{95} \leq 0,3$ mm	$D_{15} > 9 d_{95}$	$D_{15} > 9 d_{95}$
$0,3$ mm < $d_{95} < 2$ mm	$D_{15} \leq 0,7$ mm	$D_{15} > 9 d_{95}$
$d_{95} \geq 2$ mm		
$F \geq 35$	nur mit Filterversuchen	$D_{15} > 9 d_{95}$
$15 < F < 35$	$D_{15} \leq 2,5 ((35 - F) \square)$ ($4 d_{95} - 0,7$ mm)/20 + 0,7 mm)	$D_{15} > 9 d_{95}$
$F \leq 15$	$D_{15} > 9 d_{95}$	$D_{15} > 9 d_{95}$

vorzeitig durch Sackungen oder Setzungstrichter an der Oberfläche abzeichnen, was eine gewisse Reaktionszeit einräumt. Auch die rückschreitende Erosion an einem ungefilterten Austritt der Durchsickerung macht sich in der Regel durch Materialaustrag an der Oberfläche bemerkbar. Kritischer sind diesbezüglich Erosionsröhren in bindigen Dichtungskernen, da zum einen keine sichtbaren Anzeichen auftreten und zum anderen Maßnahmen zur Verringerung der Durchsickerung an der wasserseitigen Böschung schwer umzusetzen sind.

Ob sich ein Riss in einem bindigen Material, dessen Partikel nicht von einem Filter aufgehalten werden, vergrößert, hängt von der Erodierbarkeit des Bodens und der hydraulischen Belastung ab.



G.U.B. Ingenieurgesellschaften

Geotechnik • Umwelttechnik • Bautechnik



Für die Glückwünsche und die Unterstützung
zu unserem 15jährigen Firmenjubiläum
bedanken wir uns bei allen Gratulanten sehr herzlich.

Auch zukünftig bieten wir Ihnen mit über 120 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern an
12 Standorten Ingenieurleistungen aus einer Hand:

- Geotechnisches Projektmanagement
- Ingenieurgeologische und geotechnische Beratung
- Baugrundgutachten, Gründungsberatung und Standsicherheitsuntersuchungen, Erdstatik
- Nach RAP Stra 04 anerkanntes Bodenphysikalisches Labor, geotechnische Felduntersuchungen
- Bergbauplanung, Deponieplanung
- Tagebaurestloch-, Halden- und Deponiesanierung, Altbergausanierungsplanung
- Umweltprojektcontrolling, Projektsteuerung, Altlasten- und Asbestuntersuchungen
- Tief- und Verkehrsbauplanung, Oberbauleitung
- Hochwasserschutz und konstruktiver Wasserbau, Dammbau
- Landschaftsplanung, Umweltverträglichkeitsuntersuchungen
- Ingenieurvermessung, Präzisionsvermessung, Geoinformationssysteme
- Geophysik und Ingenieurseismologie
- Emissions-/Immissionsmessstelle nach §§ 26, 28 BImSchG

G.U.B. Ingenieurgesellschaft mbH
Katharinenstraße 11
08056 Zwickau

Telefon: 0375 / 21 17 50
Fax: 0375 / 21 21 17

Mail: info@gub-ing.de
Internet: www.gub-ing.de

Zwickau Chemnitz Bernsdorf Schwarzenberg Plauen Dresden Leipzig
Gera Marienberg Cottbus Berlin Erfurt

Die hydraulische Belastung (Schubspannung τ) lässt sich aus dem hydraulischen Gradienten und einer Rissweitenabschätzung rückrechnen. Die Erodierbarkeit von Böden lässt sich mit der kritischen Schubspannung τ_0 für den Erosionsbeginn beschreiben. Für $\tau > \tau_0$ findet Materialaustrag statt, wobei die Erosionsgeschwindigkeit vom Erosionsratenindex I_{HET} nach WAN/FELL (2004b), $I_{\text{HET}} < 2$: sehr schnelle beziehungsweise $I_{\text{HET}} > 6$: sehr langsame Erosion) bestimmt wird. Der Erosionsratenindex kann in so genannten Pinhole (HET) oder Slot Erosion Tests (SET) versuchs-technisch ermittelt oder überschlägig nach WAN/FELL (2004b) abgeschätzt werden. Für Böden mit Tonanteilen $> 20\%$ oder Feinteilanteil $> 50\%$ ist ein $I_{\text{HET}} > 3$ wahrscheinlich. Die Erosionsrate, welche die Geschwindigkeit bestimmt, mit der sich ein Riss tatsächlich vergrößert, berechnet sich zu $\varepsilon_c = 10^{-I_{\text{HET}}} (\tau - \tau_0)$ in $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$. Die Erodierbarkeit von Böden wird auch vom Verdichtungs- und vom Sättigungsgrad beeinflusst.

Wenn die Leckageabflüsse bei Vergrößerung einer Erosionsröhre groß werden, kann der Durchfluss auch durch die Stützkörper oder andere Elemente wie eine Betonoberflächendichtung begrenzt werden, in denen sich dann ein hydraulischer Gradient einstellt. Material aus dem wasserseitigen Filter wird entweder die Erosionsröhre verstopfen, oder es stellt sich im äußersten Fall eine Sickerlinie wie in einem homogenen Damm ein, wenn es nicht vorher zu geostatischem Versagen kommt.

Überwachung und Gegenmaßnahmen

Der Überwachung und Intervention kommt im Rahmen des Systemansatzes eine große Bedeutung zu. Es liegt auf der Hand, dass die Wahrscheinlichkeit eines Versagens wegen hydrodynamischer Bodendeformation durch rechtzeitiges Erkennen von Erosionsbeginn, Erosionsentwicklung oder Erosionsfortschritt abnimmt. Faktisch kann eine erfolgreiche Überwachung ausreichend Zeit schaffen, um mit geeigneten Gegenmaßnahmen ein Versagen zu verhindern oder zu verzögern.

Ob wirksame Gegenmaßnahmen durchgeführt werden können, hängt neben einem erfolgreichen Erkennen und Lokalisieren kritischer Erosionsprozesse von Art und Ort der hydrodynamischen Bodendeformation, von der Zugänglichkeit, von verfügbarem Personal, Gerät und Material und nicht zuletzt von der verfügbaren Zeit ab. Im Gegensatz zu Flussdeichen kann bei Speicherbauwerken unter Umständen eine Stauspiegelabsenkung durchgeführt werden.

Hinweise auf hydrodynamische Bodendeformation resultieren typischerweise aus Beobachtungen der Durchsickerung, die bei Dämmen traditionell durch visuelle Kontrollen, Sickerwasser- oder Porenwasserdruckmessungen erfolgt. Die unersetzliche visuelle Kontrolle beschränkt sich

dabei naturgemäß auf das Erkennen von Veränderungen an der Luftseite und somit auf oberflächennahe Auswirkungen der Durchsickerung. Sickerwasserabflussmessungen ermöglichen eine Ortung von Schadstellen nur bei hinreichender Schotteinteilung. Eine besondere Bedeutung kommt der Beobachtung oder Messung der Trübheit des Leckageabflusses zu. Bei Stauhaltungs-dämmen oder Kraftwerkskanälen ist eine lückenlose Sickerwassermessung aufgrund ihrer großen Länge mit herkömmlichen Methoden meist nicht möglich. Hier erfolgt die Kontrolle der Durchsickerung in der Regel punktuell, zum Beispiel mit Piezometern oder Pegeln.

Von den neueren geophysikalischen Methoden (Self potenzial, Electrical resistivity, Ground penetrating Radar) gilt die thermische Leckageortung als besonders wirkungsvoll (KBR, 2003). Für eine lückenlose Überwachung steht seit einigen Jahren die verteilte thermische Leckageortung zur Verfügung (PERZLMAIER et al., 2006). Für die Beurteilung von Gefahrenpotenzialen eignet sich dabei die verteilte Filtergeschwindigkeitsmessung mit der Aufheizmethode (PERZLMAIER, 2006b) besonders, da sie erstmals eine direkte und verteilte Messung des für hydrodynamische Bodendeformation maßgebenden Parameters Filtergeschwindigkeit ermöglicht.

Versagen

Versagensformen, die durch hydrodynamische Bodendeformation eingeleitet werden, sind entweder hydraulischer oder geostatischer Art und unterscheiden sich in Ablauf und Dauer. Eine standfeste Erosionsröhre durch den Damm oder dessen Untergrund kann ohne Zusammenbruch des Schüttkörpers zu großen Leckageabflüssen führen. Das Versagen von Dichtungen mit resultierendem Anstieg der Sickerlinie im Stützkörper kann zu Böschungsbruch mit anschließender Überströmung und Breschenbildung führen. Sackungen oder Setzungen an der Krone können anfänglich zum Verlust des Freibords und weiter zu Überströmung mit Breschenbildung führen.

Die Ereignisbäume, die eine Aneinanderreihung von Teilprozessen bis hin zum Versagen bedingt durch hydrodynamische Bodendeformation zusammenfassen, sollten die vier in Bild 2 beschriebenen Phasen durchlaufen. Zusätzliche Betrachtungen des Lastfalls (zum Beispiel Normal- oder Vollstau, Erdbeben), des Orts der hydrodynamischen Bodendeformation (zum Beispiel im Dammkörper, im Untergrund oder an der Aufstandsfläche) sowie der Möglichkeiten einer erfolgreichen Überwachung und Intervention sollten in einem vollständigen Ereignisbaum enthalten sein. Für die Anwendung ist es von großer Bedeutung, kritische Versagensmechanismen zu extrahieren. Bei Staudämmen tritt hydrodynamische Bodendeformation im Dammkörper nach FOSTER et al. (2000) doppelt so häufig auf wie im Untergrund

und zwanzigmal häufiger als vom Damm in den Untergrund. Rund zwei Drittel der ausgewerteten Versagensereignisse traten in den ersten fünf Betriebsjahren auf.

Beispiele aus dem Deichbau

Allgemeines

Bei der Beurteilung bestehender Deiche können die teilweise jahrzehntelangen Erfahrungen mit Hochwasser, sozusagen als Naturversuch, bei der Beurteilung der Anfälligkeit gegen hydrodynamische Bodendeformation helfen. Eine derartige Begutachtung schließt nicht aus, dass ein Bauwerk geohydraulisch instabil ist und innerhalb kurzer Zeit versagen könnte, aber besagt immerhin, dass die Summe der bisher aufgetretenen Belastungen noch zu keiner oder nur einer unmerklichen Beeinträchtigung geführt hat. Sind Anzeichen der hydrodynamischen Bodendeformation zum Beispiel in Form von Erosionstrichtern oder Auswurftrichtern vorhanden, müssen Ertüchtigungsmaßnahmen in Erwägung gezogen werden (HASSELSTEINER, 2006).

Zur Beurteilung der geohydraulischen Stabilität benötigt man Kenntnisse über den Deichaufbau und die verwendeten Deichbaumaterialien, über den Deichuntergrund, über die Durchsickerung und die daraus resultierenden hydraulischen Belastungen, über Umwelteinflüsse (Frost, Hitze, Bewuchs, Nutzungen) sowie über deren Auswirkungen (zum Beispiel Risse). Ferner können Dichtungen und Bauwerke die Durchsickerung beziehungsweise die Prozesse der hydrodynamischen Bodendeformation maßgebend beeinflussen.

Da es derzeit noch nicht möglich ist, den einzelnen Phasen der hydrodynamischen Bodendeformation im Systemansatz exakte Eintretenswahrscheinlichkeiten p beziehungsweise Nichtein-

Tabelle 4. Verwendete Bezeichnungen und ihre Zuordnung zu Eintrittswahrscheinlichkeiten (aus HUBER et al., 2003).

Bezeichnung	Wahrscheinlichkeit
Sicher	$\leq p = 1$ ($q = 1 - 100$)
Wahrscheinlich	$\leq p = 10^{-1} = 0,1$
Möglich	$\leq p = 10^{-2} = 0,01$
Nicht auszuschließen	$\leq p = 10^{-3} = 0,001$
Unwahrscheinlich	$\leq p = 10^{-4} = 0,0001$
Auszuschließen	$\leq p = 10^{-5} = 0,00001$

trittswahrscheinlichkeiten $q = (1 - p)$ zuzuordnen, muss man sich mit vereinfachenden probabilistischen Beschreibungen weiterhelfen. Für die im Folgenden betrachteten Szenarien der hydrodynamischen Bodendeformation in unterschiedlichen Deichsystemen wurden die in Tabelle 4 beschriebenen Bezeichnungen verwendet.

Ereignisbaumanalyse

Für drei typische Versagensabläufe der hydrodynamischen Bodendeformation bis hin zum Beginn des Deichbruchs werden im Folgenden Ereignisbäume entwickelt. Als repräsentative Bodenmaterialien wurden bei den drei Deichsystemen ein typischer Kies für Untergrund und Deich sowie ein Schluff für Dichtung und Auenboden zu Grunde gelegt, deren Bodenparameter und Körnungsbänder einschließlich Schwankungsbreiten in Bild 4 dargestellt sind. Weiterhin ist die Anwendung einiger Filterregeln illustriert.

Deichsystem A stellt einen homogenen Deich auf durchlässigem Untergrund dar. Die landseitige Böschung ist durch eine 12 cm mächtige Vegetationsschicht bedeckt. Der Deich ist 3 m hoch, hat eine Kronenbreite von 3 m und Böschungsneigungen von 1 : 3. Der Aquifer hat eine Mächtigkeit von 10 m. Als Versagensfall wird die rückschreitende Erosion durch den Deichkörper untersucht. Als Erosionsbeginn wird eine Fehlstel-

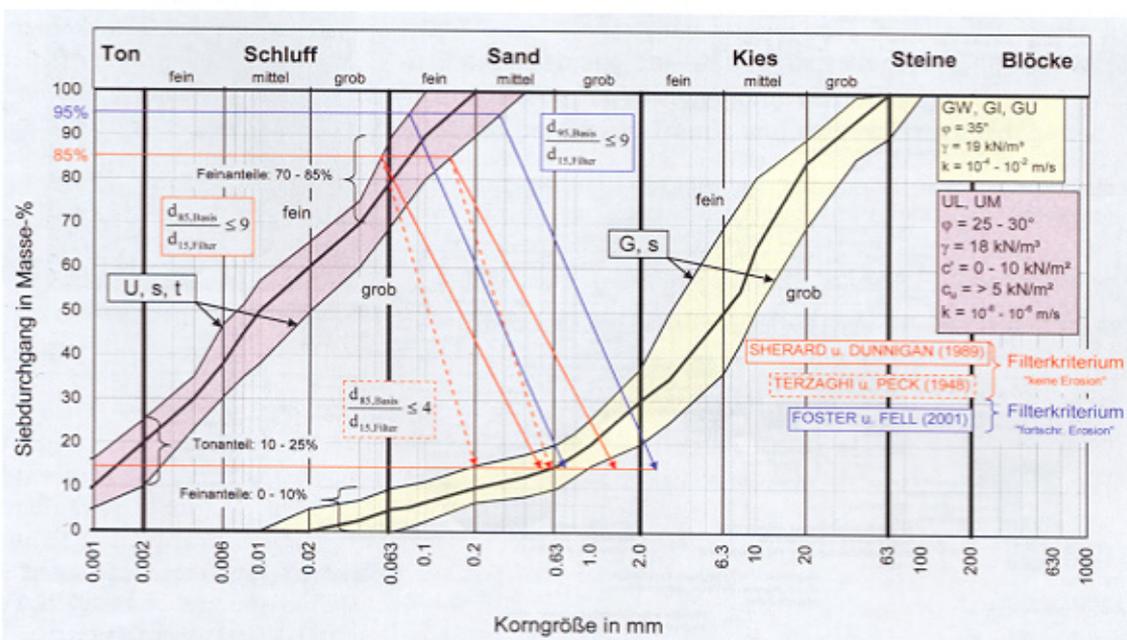


Bild 4. Körnungsbänder der betrachteten Böden mit Filterkriterien.

le mit dem Durchmesser 10 cm in der Vegetationsdecke am unteren Ende des landseitigen Deichfußes angenommen (Bild 5, System A). Deichsystem B ist ein auf einer Auenbodenschicht gelagerter Deich, der eine Böschungsneigung von 1 : 2 aufweist und ansonsten dem Deich von System A entspricht. Die Auenbodenschicht ist 1 m mächtig und auf 9 m mächtigem Kies gelagert. Es wird die rückschreitende Erosion mit Ausbildung einer Erosionsröhre unter der bindigen Deckschicht untersucht. Der Beginn der Erosion wird an einer Fehlstelle im Auenboden (ϕ 10 cm) direkt am Deichfuß angenommen (Bild 5, System B). Das Deich-

system C besteht aus einem Deich mit Oberflächen-dichtung auf Auenboden. Aufgrund der hydraulischen Trennung zwischen Untergrund und Deich werden die Untergrundverhältnisse außer Acht gelassen. Die Oberflächen-dichtung ist etwa 50 cm dick und von einer 20 cm Deckschicht inklusive Vegetationsschicht geschützt. Als Erosionsbeginn wird Kontakterosion zwischen Dichtung und Stützkörper betrachtet. Die vorgestellten Deichsysteme entsprechen teilweise nicht den allgemein anerkannten Regeln der Technik und repräsentieren Bestandsdeiche, deren Standsicherheit mehr oder minder gefährdet ist.

Bild 5. Untersuchte Deichsysteme mit entsprechenden Ereignisbäumen.

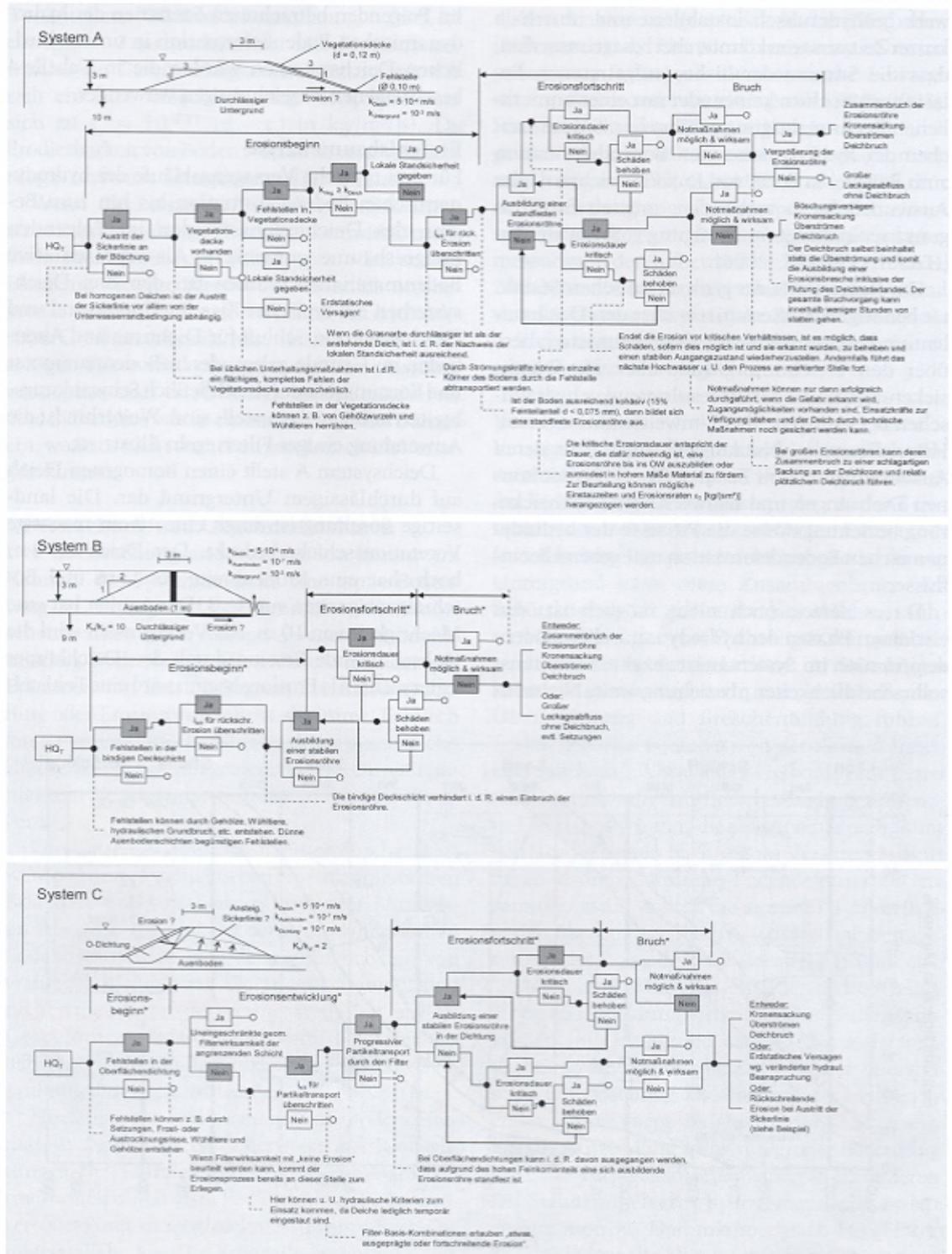


Tabelle 5. Wahrscheinlichkeitsorientierte Beurteilung der Gefahr des Deichbruchs durch Erosion an drei verschiedenen Deichsystemen (vgl. Bild 5).

System A		Ja	Nein	Anmerkung
Prozess / Ereignis	Bezeichnung	p	1-p	
HQ _T	-	5.0E-03	1.0E+00	Annahme eines HQ ₂₀₀ (Kronenstau)
Austritt der Sickerlinie an der Böschung	Sicher	1.0E+00	0.0E+00	Sehr durchlässiger Deichkörper, grobe Abschätzung
Vegetationsdecke vorhanden	Sicher	1.0E+00	0.0E+00	Ist i. d. R. immer vorhanden.
Fehlstellen in der Vegetationsdecke	Wahrscheinlich	1.0E-01	9.0E-01	Kleine Fehlstellen durch Wühltiere sind wahrscheinlich.
$k_{veg} > k_{körn}$	Sicher	1.0E+00	0.0E+00	Magerrasen mit hoher Durchlässigkeit vorhanden.
Lokale Standsicherheit gegeben	Auszuschließen	0.0E+00	1.0E+00	Der Nachweis des körnigen Erdmaterials muss ohne (Wurzel)Kohäsion geführt werden.
i_{veg} für rück. Erosion überschritten	Wahrscheinlich	1.0E-01	9.0E-01	$i_{veg,max} = 0,68$ $i_{veg} = 0,40$ (Bild 2)
Ausbildung einer standfesten Erosionsröhre	Auszuschließen	0.0E+00	1.0E+00	Feinanteil des Deichbodens < 10 % (Bild 4)
Erosionsdauer kritisch	Möglich	1.0E-02	9.9E-01	progressiver Materialaustrag nicht ausgeschlossen
Notmaßnahmen möglich & wirksam	Unwahrscheinlich	1.0E-04	1.0E+00	kein Deichverteidigungsweg vorhanden
Wahrscheinlichkeit für Beginn des Deichbruchs (bei eingetretenem Hochwasser)		5.0E-07		
		1.0E-04		

System B		Ja	Nein	Anmerkung
Prozess / Ereignis	Bezeichnung	p	1-p	
HQ _T	-	5.0E-03	1.0E+00	Annahme eines HQ ₂₀₀ (Kronenstau)
Fehlstellen in der bindigen Deckschicht	Wahrscheinlich	1.0E-01	9.0E-01	Auenböden variieren in ihrer Dicke, Auftriebsicherheit nicht gegeben
i_{veg} für rück. Erosion überschritten	Wahrscheinlich	1.0E-01	9.0E-01	$i_{veg,max} = 0,41$; Suffosion nach KENNEY & LAU (1989) und BURENKOVA (1993) unwahrscheinlich, $i_{veg} = 0,40$ (Bild 2)
Ausbildung einer stabilen Erosionsröhre	Sicher	1.0E+00	0.0E+00	Tragwirkung der bindigen Deckschicht
Erosionsdauer kritisch	Unwahrscheinlich	1.0E-04	1.0E+00	$i_{veg,max} = 0,2$; nach CHUGAEV (1960) ok / nach BLIGH (1912) nicht ok / nach SCHMERTMANN (2000) ok
Notmaßnahmen möglich & wirksam	Auszuschließen	0.0E+00	1.0E+00	kein Deichverteidigungsweg vorhanden
Wahrscheinlichkeit für Beginn des Deichbruchs (bei eingetretenem Hochwasser)		5.0E-09		
		1.0E-05		

System C		Ja	Nein	Anmerkung
Prozess / Ereignis	Bezeichnung	p	1-p	
HQ _T	-	5.0E-03	1.0E+00	Annahme eines HQ ₂₀₀ (Kronenstau)
Fehlstellen in der Oberflächendichtung	Wahrscheinlich	1.0E-01	9.0E-01	Ursache: Risse durch Austrocknung, Frost, Setzungen
Geom. Filterwirksamkeit der angrenzenden Schicht	Unwahrscheinlich	1.0E-04	1.0E+00	Geometrische Filterkriterien (vgl. Bild 4); TERZAGHI & PECK (1948) nicht ok / SHERARD & DUNNIGAN (1989) teilweise ok
i_{veg} für Erosion überschritten	Sicher	1.0E+00	0.0E+00	Keine Informationen über die Erodierbarkeit der Basis.
Progressiver Partikeltransport durch den Filter	Wahrscheinlich	1.0E-01	9.0E-01	Nach FOSTER & FELL (2001) "fortschreitende Erosion" nur für feinste Basis und größten Filter möglich.
Ausbildung einer stabilen Erosionsröhre	Sicher	1.0E+00	0.0E+00	Schluffe sind i. d. R. ausreichend kohäsiv.
Erosionsdauer kritisch	Sicher	1.0E+00	0.0E+00	Lange Einstauzeit wird angenommen. Zusätzlich ist kein wasserseitiger Reservefilter vorhanden. Die Erosionsrate liegt sehr hoch: $c_2 > 50$ kg/(sm ²) (nach WAN & FELL)
Notmaßnahmen möglich & wirksam	Auszuschließen	0.0E+00	1.0E+00	Notmaßnahmen zur Verhinderung der Durchsickerung wasserseitig i. allg. nicht wirksam.
Wahrscheinlichkeit für Beginn des Deichbruchs (bei eingetretenem Hochwasser)		5.0E-05		(erdstatistisches Versagen durch Anstieg der Sickerlinie)
		1.0E-02		

Für die drei Systeme wurden jeweils Ereignisbäume aufgestellt und anschließend alle Knoten entlang des markierten Pfades bezüglich der Eintretenswahrscheinlichkeit beurteilt. Bei diesen drei Ereignispfaden handelt es sich um typische, bei Deichen mögliche Erosionsabläufe. Die Belastung der Deiche resultiert bei allen Fällen aus einem Einstau bis zur Krone (LF 3, DIN 19 712). Zur Beurteilung der Erosion müssen im Einzelfall die lokal auftretenden hydraulischen Gradienten betrachtet werden. In Tabelle 5 sind die in Bild 5 markierten Ereignispfade aufgeführt und mit den unscharfen Wahrscheinlichkeiten aus Tabelle 4 belegt. Die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Deichbruchs initiiert durch hydrodynamische Boden-

scheinlichkeiten der einzelnen Phasen (Knoten) zusammen. Unterschieden wird hier zwischen der absoluten Eintretenswahrscheinlichkeit unter Berücksichtigung des Auftretens des Bemessungshochwassers und der bedingten Eintrittswahrscheinlichkeit für den Fall, dass das Bemessungshochwasser bereits eingetreten ist. Für das Bemessungshochwasser (hier: Kronenstau) wurde eine Wiederkehrzeit von $T = 200$ a angenommen. Die absolute Eintrittswahrscheinlichkeit kann, bei Berücksichtigung des Schadenspotenzials, zur Beurteilung des vorhandenen Risikos herangezogen werden. Die bedingte Wahrscheinlichkeit dagegen ermöglicht eine Aussage, mit welcher Wahrscheinlichkeit der Deich als Ingenieurbauwerk bei Auftreten der Bemessungskräfte versagt.

Die Ergebnisse der untersuchten Versagensprozesse sind sehr unterschiedlich. System A weist bei eingetretenem Einstau bis zur Krone eine relative Eintrittswahrscheinlichkeit, dass der Deichbruch beginnt, von $p = 1 \cdot 10^{-4}$ auf (vgl. Tabelle 5, oben). Das Ergebnis beruht auf der schützenden Wirkung der Vegetationsdecke, den relativ hohen kritischen hydraulischen Gradienten für Kies und der Möglichkeit, dass bei Kiesdeichen mit kleinen Fehlstellen der Vegetationsdecke die Belastungsdauer größer sein müsste als die Dauer eines einzelnen Hochwassers.

System B zeigt bei rückschreitender Erosion eine geringere Eintrittswahrscheinlichkeit für den beginnenden Deichbruch von $p = 1 \cdot 10^{-6}$ bei eingetretenem Hochwasser (vgl. Tabelle 5, Mitte), was darauf zurückzuführen ist, dass sich zuerst eine Fehlstelle durch die Deckschicht entwickeln muss und die kritischen hydraulischen Gradienten für den Beginn der Erosion für Kiese groß sind, was einen Erosionsbeginn durch rückschreitende Erosion nur wahrscheinlich, aber nicht sicher erscheinen lässt. Ausschlaggebend für die niedrige Eintretenswahrscheinlichkeit sind die Nachweise, die es ermöglichen, den Erosionsfortschritt beziehungsweise das Eintreten einer kritischen Erosionsdauer als unwahrscheinlich zu klassifizieren. Dies hängt mit den niedrigen mittleren hydraulischen Gradienten im Untergrund zusammen.

System C weist bei Kronenstau eine sehr hohe Wahrscheinlichkeit für beginnenden Deichbruch von etwa $p = 10^{-2}$ auf (vgl. Tabelle 5, unten). Dies liegt daran, dass die mit 50 cm relativ dünne Oberflächendichtung wahrscheinlich Fehlstellen aufweist und die Filterwirksamkeit des Kiesstützkörpers sehr unwahrscheinlich ist. Eine Überprüfung der Filterkriterien (vgl. Bild 4) zeigt, dass unter Berücksichtigung der Schwankungsbreite der Deichkies gegenüber dem Bodenmaterial für die Dichtung nicht ausreichend geometrisch filterwirksam ist. Eine fortschreitende Erosion kann nicht ausgeschlossen werden. Zudem kann aufgrund der sehr hoch ermittelten Erosionsrate die kritische Erosionsdauer bei entsprechend langen Einstauzeiten überschritten werden. Der Deichbruch kann bei dem betrachteten Fall auf verschiedene Weise erfolgen. Eine davon ist, dass sich durch die erhöhte Durchsickerung der

Dichtung die hydraulischen Belastungen auf die landseitige Böschung erhöhen und somit die erdstatische Standsicherheit gefährdet ist (Böschungsbruch). Ob und wie sich ein Deichbruch ausbildet, hängt wiederum von zahlreichen Faktoren ab, auf die im Rahmen dieser Betrachtung nicht näher eingegangen wird.

Insgesamt zeigen die ermittelten Eintrittswahrscheinlichkeiten für das Versagenszenario von System A ($p = 5 \cdot 10^{-7}$ beziehungsweise $1 \cdot 10^{-4}$) und System B ($p = 5 \cdot 10^{-9}$ beziehungsweise $1 \cdot 10^{-6}$), dass in diesen Fällen ein gewisses Maß an Sicherheitsreserven in den Systemen vorhanden ist. System C mit $p = 5 \cdot 10^{-5}$ beziehungsweise $1 \cdot 10^{-2}$ kann dagegen Grund zur Besorgnis geben, wenn man bedenkt, dass dies nach Tabelle 4 bedeutet, dass der Deichbruch nicht „auszuschließen“ ist.

Quellennachweis

BAW MAK (1989): *Merkblatt Anwendung von Kornfiltern an Wasserstraßen*. Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe.

BAW MSD (2005): *Merkblatt Standsicherheit von Dämmen an Wasserstraßen*. Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe.

BLIGH, W.G. (1912): *The practical design of irrigation works*. 2nd ed. London.

BURENKOVA, V.V. (1993): *Assessment of suffusion in non-cohesive and graded soils*. Brauns, Heibbaum & Schuler (Hrsg.): *Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering*, S. 357-360. Rotterdam: Balkema.

CHUGAEV, R.R. (1962): *Gründungsumriss von Wasserbauwerken*. [in russischer Sprache]. Moskau, Leningrad.

DAVIDENKOFF, R. (1964): *Deiche und Erddämme*. Düsseldorf: Werner-Verlag.

DAVIDENKOFF, R. (1970): *Unterläufigkeit von Staubbauwerken*. Düsseldorf: Werner-Verlag.

DIN 19712 (1997): *Flussdeiche*. Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN).

FELL, R. ; FOSTER, M. ; WAN, C.F. (2006): *A framework for assessing the likelihood of internal erosion and piping of embankment dams and their foundations*. Fell & Fry (Hrsg.): *Erosion and piping of dams and their foundations*. Rotterdam: Balkema.

FOSTER, M. (1999): *The probability of failure of embankment dams by internal erosion and piping*. PhD thesis, School of Civil and Environmental Engineering, The University of New South Wales.

FOSTER, M. ; FELL, R. (1999): *A framework for estimating the probability of embankment dams by piping using the event*



SCANROCK

Pfahlprobelbelastungen mit der Osterberg-Pressen (O-cell®) von Loadtest:



Vorteile der vielfach prämierten O-cell®

- Lastkonstanthaltung
- Hohe Arbeitssicherheit
- Kostengünstig
- Platzsparend
- Hohe Prüflasten (unbegrenzt)
- Zeitsparend
- Kein Widerlager am Pfahlkopf
- Keine Reaktionspfähle oder Anker

Florida London VAE Singapur



Europäisches Büro: Deutsches Büro:

LOADTEST Limited
14 Scotts Avenue
Sunbury on Thames
Middlesex, TW16 7HZ, UK
Phone & Fax:
+44 (0) 1932 784807
www.loadtest.co.uk

SCANROCK GmbH
Mühlenweg 3
D- 29227 Celle
Tel: +49 (0) 5141 28200
Fax: +49 (0) 5141 6205

www.scanrock.de

www.scanrock.de

tree method. UNICIV Report No. R-377. School of Civil and Environmental Engineering, The University of New South Wales.

FOSTER, M. ; FELL, R. (2001): *Assessing embankment dam filters that do not satisfy design criteria*. J. Geotechnical and Geoenvironmental Eng. ASCE, Vol. 127, Nr. 4, S. 398-402.

FOSTER, M. ; FELL, R. ; SPANNAGEL, M. (2000): *The statistics of embankment dam failures and accidents*. Canadian Geotechnical J. 37, S. 1000-1024.

HASELSTEINER, R. (2006): *Deichertüchtigung in Bayern – Eine Übersicht*. Fachtagung „Deichertüchtigung und Deichverteidigung in Bayern“. Berichte des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU München, Heft 107, S. 13-28.

HASELSTEINER, R. ; STROBL, TH. (2004): *Zum Einfluss von Bewuchs und Hohlräumen auf die Durchsickerung von Deichbauten*. Symposium Lebensraum Fluss. Berichte des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU München, Heft 101/2, S. 92-100.

HUBER, N.P. ; STAMM, J. ; RETTEMEIER, K. ; KÖNGETER, J. (2003): *Ereignisbaumanalysen zur Identifikation von relevanten Versagensmechanismen bei Staudämmen*. Hermann & Jensen (Hrsg.): Sicherung von Dämmen und Deichen: Handbuch für Theorie und Praxis, S. 303-320, Universitätsverlag Siegen.

KBR (2003): *Early detection of internal erosion, feasibility report, Vol. 1 of 2: main report*. Defra, Research Contract Reservoir Safety Advice, England.

KENNEY, T.C. ; LAU, D. (1985): *Internal stability of granular filters*. Canadian Geotech. J., Vol. 22, Nr. 2, S. 215-255.

KENNEY, T.C. ; LAU, D. (1986): *Internal stability of granular filters: Reply*. Canadian Geotech. J., Vol. 23, S. 420-423.

KUTZNER, C. (1996): *Erd- und Steinschüttdämme für Stauanlagen*. Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag.

LANE, E.W. (1935): *Security from under-seepage masonry dams on earth foundations*. Transaction American Soc. of Civ. Eng., Vol 100, S. 1233-1351.

MALLET, C. ; PACQUANT, J. (1951): *Erdstaudämme*. Orig. Titel: *Les Barrages en Terre*. Übersetzt aus dem Französischen: H. Ferchland. Berlin: VEB Verlag Technik.

MUCKENTHALER, P. (1989): *Hydraulische Sicherheit von Staudämmen*. Lehrstuhl und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wassermengenwirtschaft, TU München, Bericht Nr. 61.

MÜLLER-KIRCHENBAUER, H. ; RANKL, M. ; SCHLÖTZER, C. (1993): *Mechanism for regressive erosion beneath dams and barrages*. Brauns, Heibaum & Schuler (Hrsg.): *Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering*, S. 369-376. Rotterdam: Balkema.

PARK, J. (2003): *Investigation of the ability of filters to stop erosion through cracks in dams*. Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and States University.

PERZLMAIER, S. (2006a): *Hydraulic criteria for internal erosion in cohesionless soil*. Fell & Fry (Hrsg.): *Erosion and piping of dams and their foundations*. Rotterdam: Balkema.

PERZLMAIER, S. (2006b): *Der Wärmeübergang vom Heizzyylinder an gesättigte und durchströmte Schüttungen*. Workshop „Anwendung und Grenzen physikalischer und numerischer Modelle im Wasserbau“. Berichte des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU München, Heft 104, S. 135-150.

PERZLMAIER, S. ; PORRAS, P. ; AUFLEGER, M. (2006): *Anwendungskonzepte verteilter faseroptischer Leckageortung*. V. Mittweidaer Talsperrentag „Messtechnische Überwachung von Stauanlagen“.

SAUCKE, U. (2004): *Bewertung der Erosionsanfälligkeit strukturierter körniger Sedimente*. Veröffentlichungen des Instituts für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe, Heft 162.

SAUCKE, U. (2006): *Nachweis der Sicherheit gegen innere Erosion für körnige Erdstoffe*. geotechnik 29 (2006) Nr. 1, S. 43-53.

SHERARD J.L. ; DUNNIGAN, L.P. (1989): *Critical Filters for impervious soils*. J. Geotech. Eng. ASCE, Vol. 115, Nr. 7, S. 927-946.

SCHMERTMANN, J.H. (2000): *The non-filter factor of safety against piping through sands*. ASCE Geotechnical Special Publication No. 111, Judgement and innovation. Edited by F. Silva and E. Kavazanjian.

SCHULER, U. (1997): *Bemessung von Erdstoff-Filtern unter besonderer Berücksichtigung der Parameterstreuung*. Veröffentlichungen des Instituts für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe, Heft 143.

TERZAGHI, K. ; PECK, R. (1948): *Soil mechanics in engineering practice*. New York: John Wiley and Sons Inc.

URS (2000): *Seepage through embankment dams*. Proceedings of the research needs workshop, in the scope of the National dam safety programme, Denver Colorado.

US SCS (1986): *Engineering guide for determining the gradation of sand and gravel filters*. Soil Mechanics Note No. 1.1210-VI.

WAN, C.F. ; FELL, R. (2004a): *Experimental investigation of internal instability of soils in embankment dams and their foundations*. UNICIV Report No. R-429. School of Civil and Environmental Engineering, The University of New South Wales.

WAN, C.F. ; FELL, R. (2004b): *Investigation of rate of erosion of soils in embankment dams and their foundation*. J. Geotechnical and Geoenvironmental Eng. ASCE, Vol. 130, Nr. 4, S. 373-380.

WEIJERS, J.B.A. ; SELLMAIJER, J.B. (1993): *A new model to deal with the piping mechanism*. Brauns, Heibaum & Schuler (Hrsg.): *Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering*, S. 345-355. Rotterdam, Balkema.

WITTMANN, L. (1980): *Filtrations- und Transportphänomene in porösen Medien*. Veröffentlichungen des Instituts für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe, Heft 86.

ZIEMS, J. (1969): *Beitrag zur Kontakterosion nichtbindiger Erdstoffe*. Dissertation, Technische Universität Dresden.